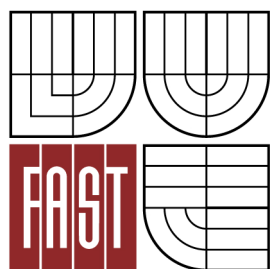




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

BEHAVIOR OF CONCRETE AT HIGH TEMPERATURES

STUDIUM CHOVÁNÍ BETONU PŘI PŮSOBENÍ VYSOKÝCH TEPLŮT

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

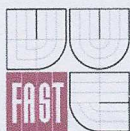
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ING. MICHAELA FIEDLEROVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. LENKA BODNÁROVÁ, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor 3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant Ing. MICHAELA FIEDLEROVÁ

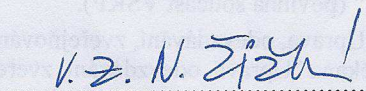
Název Studium chování betonu při působení vysokých teplot

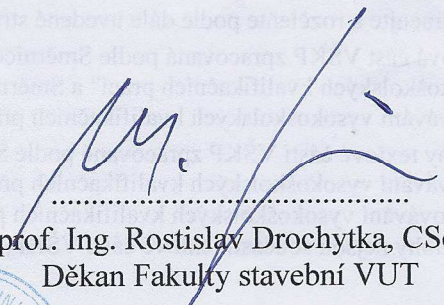
Vedoucí diplomové práce Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce 31. 3. 2013

Datum odevzdání diplomové práce 17. 1. 2014

V Brně dne 31. 3. 2013


.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Vedoucí ústavu


.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT



Podklady a literatura

Designing Concrete Structures for Fire Safety, ACI, SP-255

Bradáčová, I. Stavby z hlediska požární bezpečnosti. ERA group, s.r.o. Brno 2007. ISBN 978-80-7366-090-1.

Bodnárová, L. Kompozitní materiály, učební opora VUT Brno, FAST, 2007

Drochytka, R. Trvanlivost stavebních materiálů, učební opora VUT Brno, FAST, 2008

ČSN EN 1992-1-2 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru.

Sborníky z tuzemských a zahraničních konferencí (r. 2008-2013). České a zahraniční normy. Internetové zdroje.

Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

Předmětem diplomové práce je studium chování cementových betonů při působení vysokých teplot.

V teoretické části popište chování cementových betonů při působení vysokých teplot. Zaměřte se zejména na explozivní odprýskávání betonu. Uveďte příčiny explozivního odprýskávání a možnosti jeho eliminace.

Na základě rešerší literatury definujte požadavky na vhodný typ kameniva, cementu, přísad a příměsí pro prostředí s možným působením vysokých teplot.

V experimentální části diplomové práce připravte vzorky s vybraným typem cementu a rozptýlenou výztuží z polypropylenových (PP) vláken.

Proveďte zatěžování těchto vzorků na různé teplotní stupně.

Popište zvolenou metodiku teplotního zatěžování vzorků.

Proveďte sledování změn vlastností zkušebních vzorků po působení vysokých teplot.

Zhodnoťte vliv PP vláken na vlastnosti zkušebních vzorků po působení vysokých teplot.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).



Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

Abstract

Increasing intensity of road and railway transport and thus a higher risk of accidents leads to a constant increase of safety standards in tunnels. Fire development in enclosed area such a tunnel is unpredictably fast and gasoline-fuelled fire temperature can rise up to 1100°C. Fire tests undertaken in past showed that with increasing temperature evaporation of chemically and physically bounded water lead to explosive spalling. Small or greater parts spall and it complicates the evacuation of people during fire as well as leads to loss of reinforcement cover or even rapid decrease of load-bearing capacity and subsequent collapse of structure. Owing to the increasing temperature, water contained in the concrete is converted to water vapour which is associated with built up of pore pressure. If the impermeable structure of concrete does not allow the escape of water vapour the pore pressure will increase and results in development of micro-cracks, respectively macro-cracks. This problem leads to the theme "Influence of permeability on explosive spalling". The term permeability represents the rate of transmission of media or energy flows and is a measure of the porosity of the concrete. Due to the density and compactness of high performance concrete (HPC) in comparison with ordinary concrete (OC) is impermeable and therefore sensitive to spalling caused by creation of high pore pressure. Additions of polymer fibres have been proved to be most effective solution to avoid explosive spalling in the event of fire. Various types of polymer and fibre dimensions and geometries have been testing at fire test since 1990's. Polypropylene (PP) fibre has been ascertained as the most sufficient to avoid explosive spalling.

The master thesis is focused on analysis of behaviour of cement composite materials (concrete) exposed to high temperatures. Concrete specimens with different polypropylene fibres (standard and modified) of different dosage were exposed to thermal load with a high initial temperature increase of 1100°C in first 30 minutes and then constant temperature 1100°C hold up to 120 minutes (HydroCarbon curve). Experimental work was focused on different behaviour and physical mechanical properties of concrete without and with polypropylene fibres and verification of function of concrete with modified polypropylene fibres. Using the modified fibers with lower dosage of 0.9 kg/m³ reduces a negative effect of fibers on workability and processability of fresh concrete.

After exposition to high temperature load, physical mechanical properties of fibre reinforced concrete were observed and compared to reference specimens without PP-fibres and simultaneously were compared specimens with addition of standard PP-fibres with melt flow index 25 (MFI 25) and dosage 2.0 kg/m³ and modified PP-fibres with MFI 2500 and dosage 0.9 kg/m³. Surface of tested specimens was analysed by photogrammetry analysis and damage of surface was defined. Mode of action of

polypropylene fibres was observed with high temperature microscopy and video with melting properties of standard and modified fibres were gained as result. Subsequent comparison of videos show different points of softening and melting of standard fibres with MFI 25 and modified fibres with higher MFI 2500. Softening starts with difference of about 10°C. PP-fibres with lower MFI 25 start to melt at 160°C and build a drop at temperature 174°C whereas modified PP-fibres with higher MFI 2500 start to melt in the range 147 - 150°C and build a drop at temperature 160°C. This mode of action has been proven in permeability measurement when permeability of samples with modified fibres increased at temperature around 150°C and around 175°C in samples with standard fibres. Concrete permeability at different temperatures and pressures has been measured in cooperation with Technical University in Vienna. Permeability was measured at temperatures of 20°C, 90°C, 150°C, 175°C, 200°C, 225°C and 250°C and at pressure of 0.2, 0.4 and 0.6 MPa.

Keywords

explosive spalling, polypropylene fibres, Melt Flow Index (MFI), thermal load, HydroCarbon temperature curve, high performance concrete, permeability of concrete

Rozšířený český abstrakt

Se stále se zvyšující intenzitou silniční a železniční dopravy se zvyšuje i riziko nehodovosti, což vede ke zvyšování bezpečnostních požadavků v tunelech a podzemních konstrukcích. Vznik a vývoj požáru v uzavřeném prostoru, jako například v tunelu, je nepředvídatelně rychlý a benzínem živený požár má vysoký počáteční nárůst teploty, která dosahuje až 1100°C v prvních třiceti minutách. Při rychlém teplotním zatížení betonové konstrukce dochází k přeměně fyzikálně a chemicky vázané vody ve vodní páru, což vede k nárůstu pórového tlaku. Problematika explozivního odprýskávání vyvstala s požadavkem na zvyšování pevnosti betonu. Hutnější, méně propustnější struktura betonu sebou přináší i jisté nevýhody, jako např. křehkost. Impermeabilní struktura betonu neumožňuje únik vodní páry a tak dochází při požáru k nárůstu pórového tlaku, který kromě explozivního odprýskávání vede ke vzniku mikro a makro trhlin. Malé či větší úlomky odprýskávají od povrchu a komplikují evakuaci osob během požáru, dochází ke ztrátě krycí vrstvy výztuže a následnému omezení nosné kapacity konstrukce, což může vést až ke kolapsu celé konstrukce. Tato problematika tedy vede k tématu „Vliv permeability betonu na explozivní odprýskávání“, které je řešeno v experimentální části společně s tématem „Explozivní odprýskávání vysokopevnostního betonu exponovaného teplotnímu zatížení“. Permeabilita, jako měřítko pórovitosti betonu, představuje míru transmise média nebo energetických toků materiálem. Již je známo, že malé množství polypropylenových vláken přidávaných do betonové směsi efektivně ovlivňuje vlastnosti betonu proti účinkům požáru zvyšováním jeho permeability, ale negativně ovlivňuje jeho zpracovatelnost. Tato problematika zpracovatelnosti by mohla být eliminována snížením dávky vláken. Nová modifikovaná vlákna s vyšším indexem toku taveniny MFI 2500 (Melt Flow Index), patentovaná německou firmou BAUMHÜTER, umožňují snížení dávky na 0,9 kg/m³ oproti vláknům standardním.

V experimentální části této práce byly porovnávány mechanicko-fyzikální vlastnosti betonu bez přídavku polypropylenových vláken (dále jen PP-vláken), s 2 kg/m³ standardních PP-vláken s MFI 25 a s 0,9 kg/m³ modifikovaných PP-vláken s MFI 2500. Explozivní odprýskávání bylo zkoušeno na zkušebních tělesech o rozměrech (600x600x300)mm vystavených uhlovodíkové teplotní křivce po dobu 120 min. Exponovaná plocha o rozměrech (600x600)mm byla paralelně zahřívána horizontálním a vertikálním olejovým hořákem v peci o objemu 1 m³. Sledovaný povrch zkušebních těles byl podroben fotogrammetrii před i po zkoušce ohněm a tyto snímky slouží k následnému porovnání. Na snímcích je zřetelná plocha a hloubka odprýsknutého povrchu i makro-trhliny. Pro objasnění mechanismu účinku standardních PP-vláken s MFI 25 a modifikovaných vláken s MFI 2500 byla vlákna pozorována pod vysokoteplotním

mikroskopem. Z pořízeného videozáznamu bylo možné stanovit bod měknutí a tání PP-vláken a objasnit tak způsob účinku jednotlivých druhů PP-vláken.

Druhá část experimentální práce byla zaměřena na stanovení permeability betonu o stejné receptuře a s různým dávkováním PP-vláken jako v případě explosivního odprýskávání. Zkušební tělesa byla umístěna v ocelovém prstenci o průměru cca 100 mm a výšce cca 50 mm. Permeabilita byla zkoušena laboratorně pomocí stlačeného vzduchu na zkušebním zařízení sestaveném na Technické Universitě ve Vídni, které umožňuje měření permeability za různých teplot a současně za různých tlaků. Propustnost byla měřena při teplotě 20°C, 90°C, 150°C, 175°C, 200°C, 225°C a 250°C a tlaku 0,2, 0,4 a 0,6 MPa.

Doposud získané poznatky této problematiky jsou podrobně zpracovány v části teoretické. Faktory mající dominantní vliv na explosivní odprýskávání a jeho mechanismus jsou popsány v kapitole č.2. Mechanismus explosivního odprýskávání je procesem dvou paralelně probíhajících procesů: termo-mechanický a termo-hydraulický. Dále je zde uveden podrobný výčet standardů a norem pro požární ochranu ostění tunelů včetně sumarizace specifických kritérií. Ve stručnosti byl popsán vhodný návrh jednotlivých komponent betonu se zaměřením zejména na příměsi ve formě rozptýlené výztuže z polypropylenových vláken, jež se ukázala jako velmi efektivní ochrana proti odprýskávání. Polypropylenová vlákna, druhy, dávkování a především jejich mechanismus působení v betonu exponovaného požáru je popsán v kapitole č.6 a č.7.

Klíčová slova

explosivní odprýskávání, polypropylenová vlákna, index toku taveniny (MFI), teplotní zatížení, uhlovodíková teplotní křivka, vysokopevnostní beton, permeabilita betonu

Bibliografická citace VŠKP

Ing. Michaela Fiedlerová *Studium chování betonu při působení vysokých teplot*. Brno, 2014. 98 s., 7 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D..

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 10.1.2014

.....
podpis autora
Ing. Michaela Fiedlerová

Acknowledgements

I would like to express my thanks of gratitude to my supervisor Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D. as well as Dipl.-Ing. Klaus Pistol and Dr. Ing. Frank Weise who gave me the golden opportunity to do this interesting project on the topic *Explosive spalling of concrete exposed to elevated temperature*. Secondly I would also like to thank to Ass.Prof.Dipl.-Ing.Dr.techn. Heinrich Bruckner, who helped me with measurement of concrete permeability and gave me valuable advices in this topic. Finally I would also like to thank my parents and friends who helped me a lot in finishing this project within the limited time. This diploma thesis has been prepared with the financial support of the project "SUPMAT - Promotion of further education of research workers from advanced building material centre". Registration number CZ.1.07/2.3.00/20.0111. The project is cofunded by European Social Fund and the state budget of the Czech Republic. This diploma thesis has been made under the internship which increased my knowledge and interest of research.

CONTENT

1	INTRODUCTION	15
1.1	Fire protection requirements standards for tunnels structures	16
1.1.1	Superior European Directives for tunnel safety	16
1.1.2	Relevant Eurocodes for fire protection design	17
1.1.3	Application documents for fire safety in Czech Republic	17
1.2	Temperature-time curves for fires in tunnels	17
1.2.1	Cellulosic curve ISO – 834	18
1.2.2	HydroCarbon curve	19
1.2.3	RABT curve ZTV	20
1.2.4	RWS curve	20
2	EXPLOSIVE SPALLING OF HPC DUE TO FIRE EXPOSURE	21
2.1	Mechanism of explosive spalling	23
2.2	Factors influencing spalling	24
2.2.1	Heating rate	25
2.2.2	Section size	25
2.2.3	Section shape	26
2.2.4	Moisture content in concrete	26
2.2.5	Pore pressures	26
2.2.6	Permeability of the concrete	28
2.2.7	Concrete age and storing	28
2.2.8	Concrete strength, mix and quality	29
2.2.9	Type of aggregate	29
2.2.10	Thermal expansion of components	30
2.2.11	Cover to reinforcement	31
2.2.12	Polypropylene fibres	32
3	THERMO-MECHANICAL AND THERMO-HYDRAULIC MECHANISMS	33
3.1	Thermo-hydraulic mechanism	34
3.2	Thermo-mechanical mechanism	35
4	POROUS NETWORK IN CONCRETE	37
4.1	Classification of pores in concrete:	37
4.1.1	Compacting and air pores	38
4.1.2	Capillary pores	38
4.1.3	Gel pores	39
4.1.4	Interfacial transition zone	39
4.2	Permeability	40
4.2.1	Permeability of cement-based materials	43

5	METHODS TO PREVENT EXPLOSIVE SPALLING	49
5.1.	Active methods	49
5.2	Passive methods	50
5.2.1	Sprayed mortars	50
5.2.2	Pre-fabricated boards	51
6	POLYPROPYLENE FIBRES IN FIRE EXPOSURE HPC	52
6.1	State of the art of PP-fibres	52
6.1.1	Monofilament polypropylene fibers	53
6.1.2	Fibrillated polypropylene fibers	53
6.1.3	Dimensions and content of PP fibres	54
6.1.4	Melt Flow Index (Melt Flow Rate)	54
6.2	Theories about the mode of action of PP-fibre	55
6.2.1	Effect of monofilament Polypropylene fibres	55
6.2.2	Existing theories in research (practice)	58
7	APPROPRIATE DESIGN OF THE INDIVIDUAL COMPONENTS OF CONCRETE RESISTANT TO HIGH TEMPERATURES	60
7.1	Cement for concrete with higher resistance to high temperatures	60
7.2	Aggregates for concrete with high resistance to high temperatures	61
8	INTRODUCTION OF EXPERIMENTAL PART	64
9	METHODOLOGY OF EXPERIMENTAL WORK	64
10	EXPLOSIVE SPALLING	65
10.1	Preparation of experiment	65
10. 2	Preparation of specimens	65
10.3	Materials	67
10.4	Material properties / Results of experimental work	71
10.4.1	Properties of fresh concrete	72
10.4.2	Properties of hardened concrete	73
10.5	Testing of explosive spalling	74
10.5.1	Testing device	75
10.5.2	Results of experimental work	76
10.5.3	Summary and conclusion	81
11	PERMEABILITY OF CONCRETE	85
11.1	Preparation of experiment	87
11.2	Preparation of specimens	87
11.3	Materials	88
11.4	Material properties	89
11.4.1	Properties of fresh concrete	89

11.4.2 Properties of hardened concrete	91
11.5 Testing of permeability	93
11.5.1 Testing procedure	93
11.5.2 Permeability testing device	94
11.5.3 Results of experimental work	100
11.5.4 Summary and conclusion	102
12 OVERALL ASSESSMENT OF PRESENT WORK	104
13 LIST OF REFERENCES	106
14 LIST OF ACRONYMS AND SYMBOLS	110
15 LIST OF ANNEXES	110